5. Sensor de Par

5.1 Introducción:

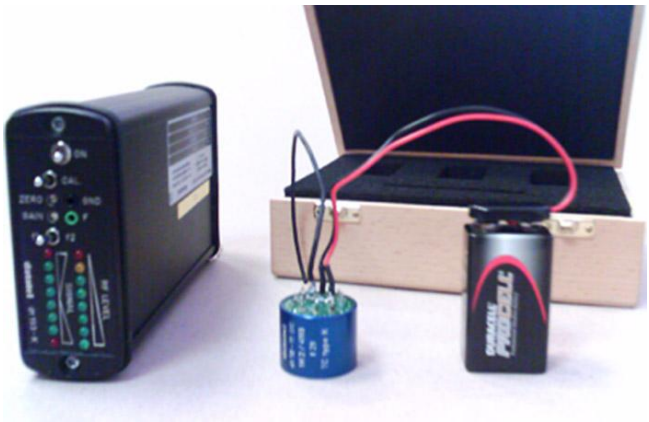
Un medidor de par es un dispositivo que mide el par que existe, por torsión en un eje, que tiene de entrada y salida los componentes entre los que se quiere medir dicho par y manda una señal eléctrica con los valores recogidos.

Existen distintos tipos de sensores de par, dependiendo de cómo se quiera medir dicho par y de la naturaleza de este. Como ejemplos obtenidos de [15]:

- Si el par es estático:

- Si el par es dinámico:

- Medidor de par sobre eje:



5.2 Sensor de Par DR-2477:

Nuestro sensor de par es el **Drehmomentsensor Typ DR-2477 mit Kupplung 951.3_1** ***torque sensor type DR-2477 with coupling 951.3_1 de la marca LORENZ MESSTECHNIK GmbH.*** En las siguientes imágenes se muestra el sensor de par usado (ilustración 5.1) y el montaje realizado con él en nuestra bancada (ilustración 5.2).

Ilustración 5.1: Sensor de par Lorenz.

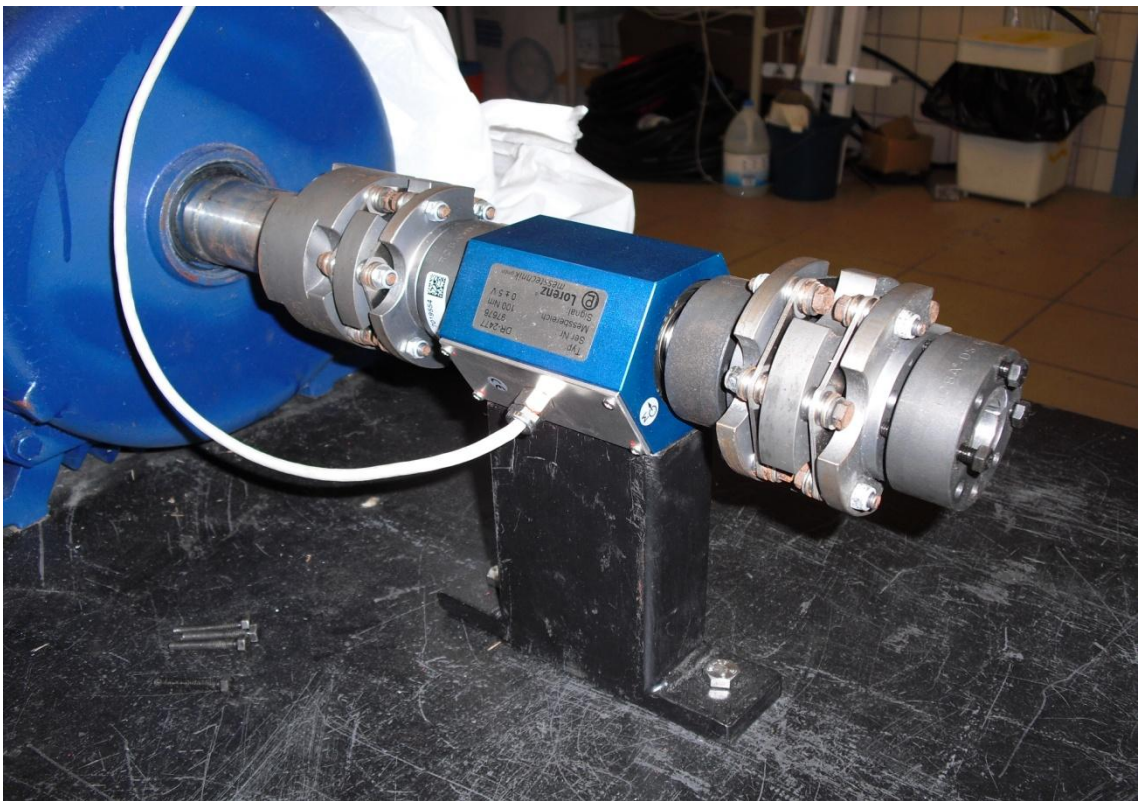


Ilustración 5.2: Montaje del sensor de par.

Las especificaciones técnicas del sensor de par DR-2477 de Lorenz que nos facilita su fabricante en el manual de usuario son [16]:

TECHNISCHE DATEN - *SPECIFICATIONS*

Typ - *Type*		**DR-2477**
Genauigkeitsklasse - *Accuracy class*	% v. E. - *f. s.*	0,25
Reproduzierbarkeit - *Repeatability* (DIN 1319)	%	±0,05
Versorgung - *Excitation voltage*	V DC	12 ... 28
Stromaufnahme - *Current consumption*	mA	<90
Ausgangssignal - *Output signal*	V	0 ... ±5
Kennwerttoleranz - *Tolerance of sensitivity*	%	±0,1
Referenztemperatur - *Reference temperature*	°C	+23
Nenntemperaturbereich - *Nominal temperature range*	°C	+5 ... +45
Gebrauchstemperaturbereich - *Service temperature range*	°C	0 ... +60
Lagerungstemperaturbereich - *Storage temperature range*	°C	-10 ... +70
Temp. koeff. des Kennwertes - *Temp. coeff. of sensitivity*	% v. E./K - *f. s./K*	+0,02
Temp. koeff. des Nullsignals - *Temp. coeff. of zero signal*	% v. E./K - *f. s./K*	±0,04
Gebrauchsdrehmoment (statisch) - *Service torque (static)*	% v. E. - *f. s.*	150
Grenzdrehmoment (statisch) - *Limit torque (static)*	% v. E. - *f. s.*	180
Bruchdrehmoment (statisch) - *Ultimate torque (static)*	% v. E. - *f. s.*	>250
Schwingbreite - *Bandwidth* (DIN 50100)	%	70 (Spitze-Spitze) - (*peak-peak*)
Schutzart - *Level of protection* (DIN EN 60529)		IP50
Elektrischer Anschluss - *Electrical connection*		1 m, freien Lötenden - 1 m, *free soldered ends*

Tabla 5.1: Características técnicas del sensor de par.

Las partes que lo conforman son:

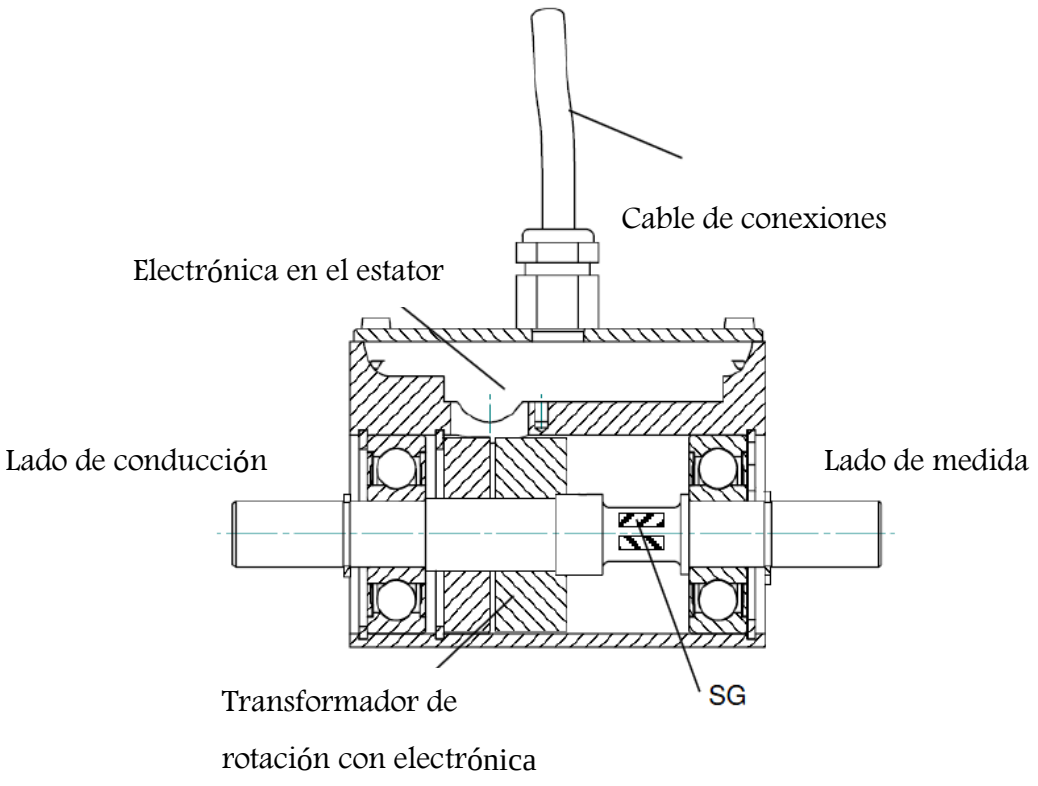


Ilustración 5.3: Partes que conforman el sensor de par de Lorenz.

- **Cable de conexiones**: es el cable donde están todos los conductores, los de la señal del par y los de alimentación.
- **SG**: son las galgas extensométricas con las que medimos el par. El funcionamiento de las galgas extensométricas es el siguiente: al producirse una deformación de torsión del eje en el que están colocadas debido al par aplicado, éstas se deforman a la misma vez que el eje, con lo que al deformarse varían su resistencia, y al medir esta variación de resistencia podemos encontrar una relación entre la deformación (resistencia) y el par aplicado.
- **La electrónica en el estator** es la que se encarga de encontrar la correspondencia entre la variación de resistencia de la galga extensométrica y el par, y manda la señal de tensión para poder registrarla.

La conexión de los cables se muestra en la siguiente tabla:

The firmly connected cable has free ends		
Green	Excitation GND	0 V
Brown	Excitation +	12 ... 28 VDC
Yellow	Signal	±5 V
White	Signal GND	0 V
Netting	Shield	

Tabla 5.2: Tabla resumen del cableado del sensor.

5.2.1 Medida con el sensor de par:

Antes de comenzar a medir con el sensor de par hay que esperar unos cinco minutos aproximadamente, para empezar a obtener valores reales (tiene un periodo de "warming-up" de 5 min.). Se deberá tener en cuenta los siguientes puntos para obtener correctas medidas de dicho sensor:

- *Dirección de par*: la dirección del par determinará la señal enviada. Si el par tiene el sentido hacia el lado de medida, la señal será positiva (da una tensión positiva), en caso contrario, la señal será negativa.
- *Par estático*: en caso de medir un par estático o cuasi-estático, que es lo que ocurre ante una aplicación lenta de par, podemos aplicar valores de par superiores a los nominales.
- *Par dinámico:* si queremos medir un par dinámico (es nuestro caso), la frecuencia del par tiene que ser más pequeña que la frecuencia de resonancia del conjunto.

El esquema del conjunto para la obtención de la frecuencia de resonancia se muestra en la ilustración 5.4:

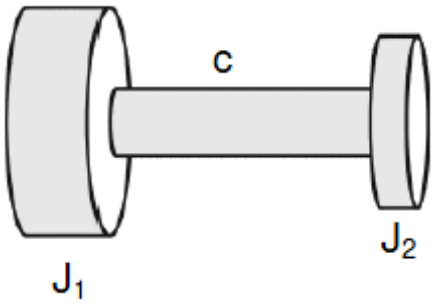


Ilustración 5.4: Esquema del conjunto.

La fórmula usada para calcular la frecuencia natural de resonancia es:

$$f0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{C\left(\frac{1}{J1}+\frac{1}{J2}\right)}$$

fo = Frecuencia natural en Hz

J1, J2 = Momento de inercia en Kg*m^2

C = Rigidez a torsión en Nm/rad

Ecuación 5.1: Ecuación para la obtención de la frecuencia natural de resonancia.

También es posible estimar la frecuencia de resonancia a través de otros métodos distintos al mostrado en la ecuación 1.

Las variables que pueden afectar a la medida son:

- Vibraciones.
- Cambios y gradientes de temperaturas.
- Variables derivadas del uso del sensor.
- Perturbaciones eléctricas y magnéticas.
- EMC (perturbaciones electromagnéticas).

Hay que evitar estas perturbaciones, aislando de las vibraciones, de los cambios de temperaturas, etc.

En la ilustración 5.5 se muestra el esquema de montaje de un sensor de par:

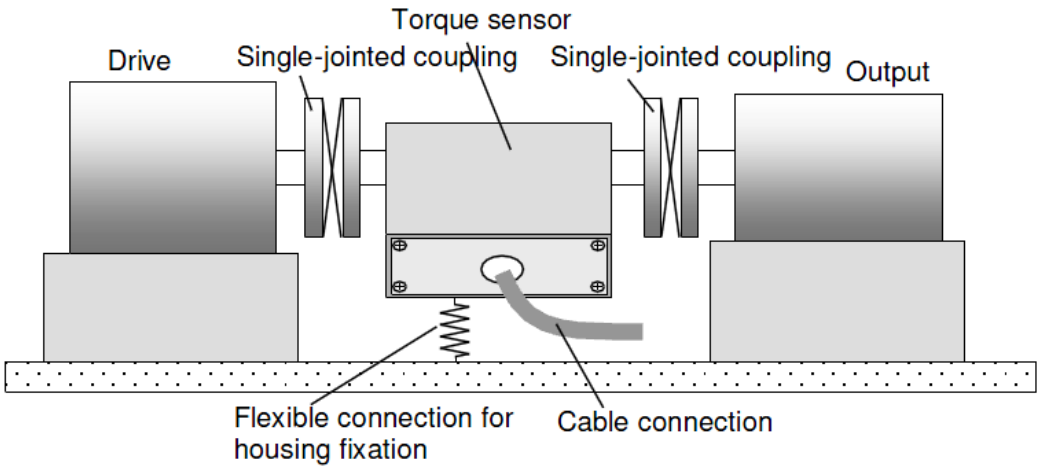


Ilustración 5.5. Montaje del medidor de par.

El medidor de par se instalará entre los dos motores eléctricos, el motor propio del vehículo (2KW) y el motor que actuará como resistencia de frenado (11 KW) con sendas conexiones flexibles. El sensor de par estará atornillado a un soporte con las dimensiones adecuadas para que el eje quede alineado con los ejes de los respectivos motores.

Como el medidor de par es muy sensible a la tensión, se decidió conectar un circuito regulador de tensión a la entrada de la alimentación, para así limitar la tensión máxima de

alimentación a un máximo de 14,78 V y prevenir de esta manera un aumento descontrolado de la tensión que le pueda afectar.

El esquema del circuito utilizado se muestra en la siguiente imagen (ilustración 5.6):

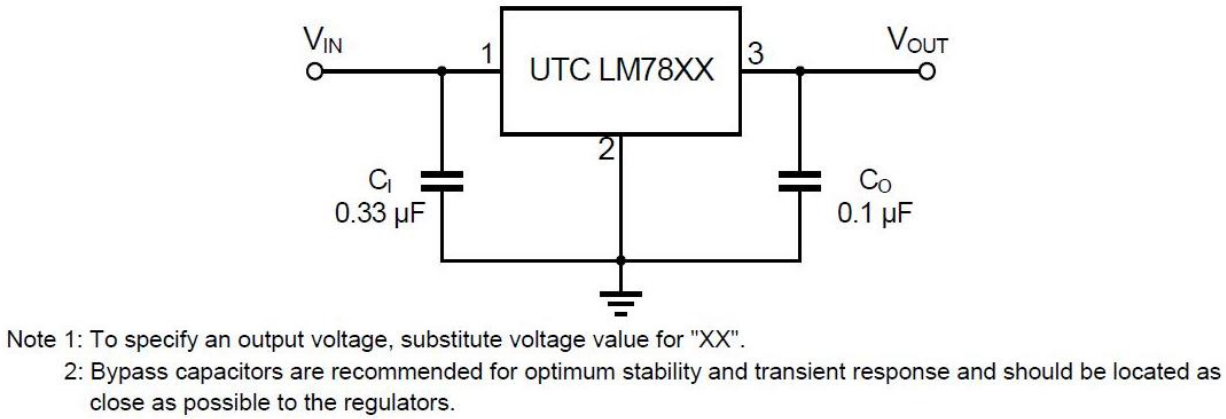


Ilustración 5.6: Circuito limitador de tensión.

El circuito realizado, una vez soldados los componentes a la placa se puede observar en la ilustración 5.7.

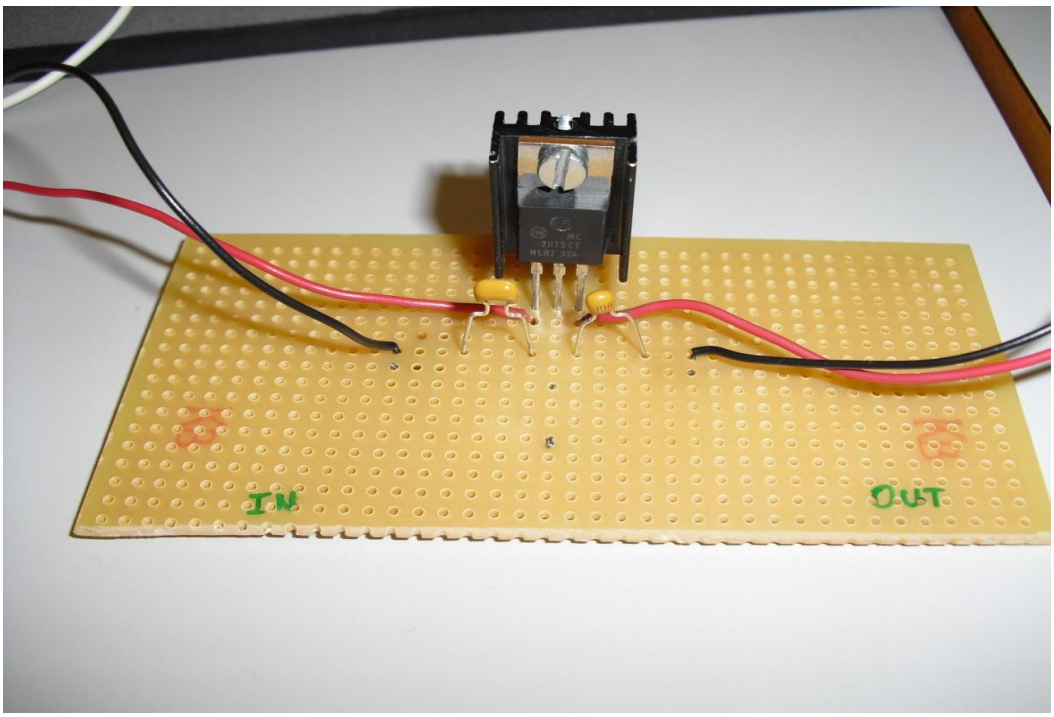


Ilustración 5.7. Circuito limitador de tensión una vez realizado.

5.3 Interfaz gráfica del sensor de par:

Para el medidor de par he creado una interfaz gráfica mediante la plataforma Labview™ en la que se obtienen los valores de tensión y par medido. El par es función de la tensión de forma que Par = 20 x V , y siguen una ley lineal, es decir:

- Si 0V = 0 Nm
- Si 5V = 100 Nm

⟶ 2,5 V = 50 Nm

En la interfaz, también se representa una gráfica con la secuencia de valores de par medido.

Los valores de par medido son guardados en un archivo de formato *.xls* llamado *Medidor_de_Par.xls* para poder disponer de todos los valores obtenidos para su posterior uso en cálculos.

En la ilustración 5.8 se puede observar la interfaz gráfica del sensor de par:

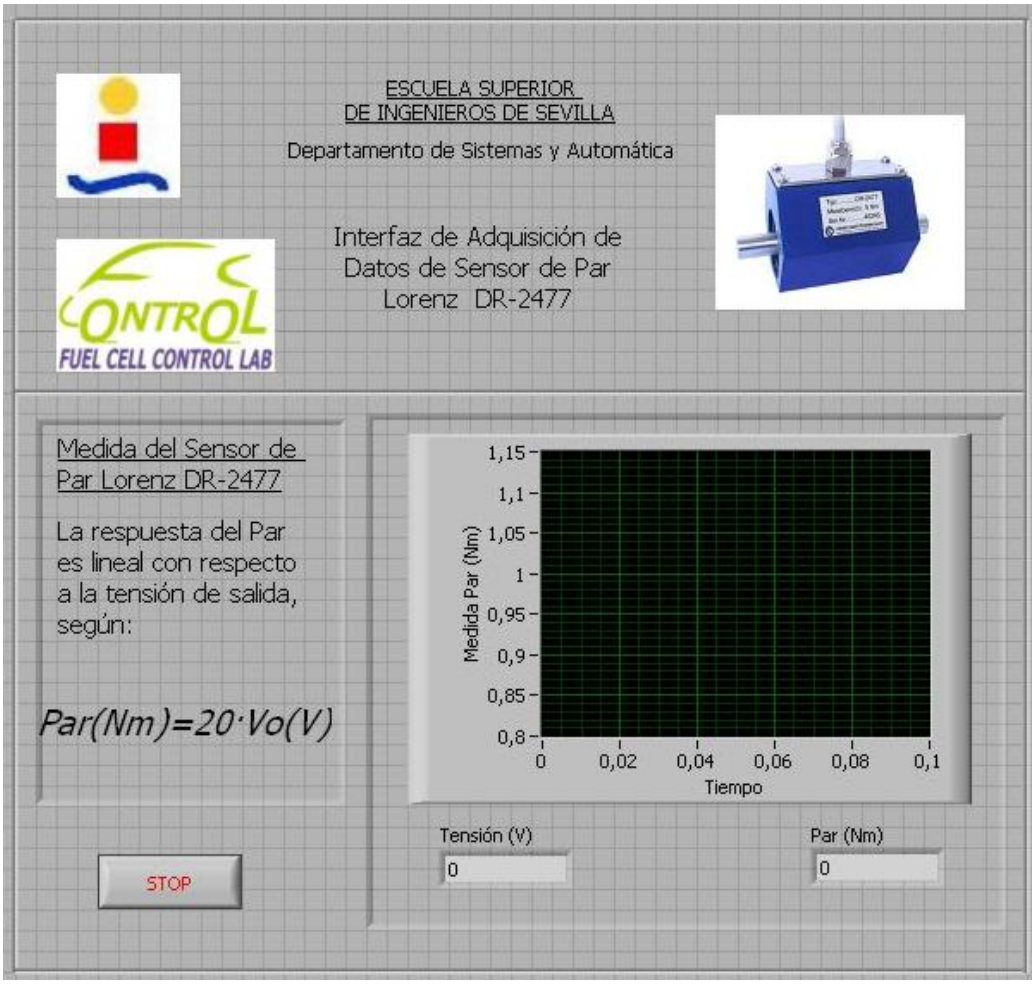
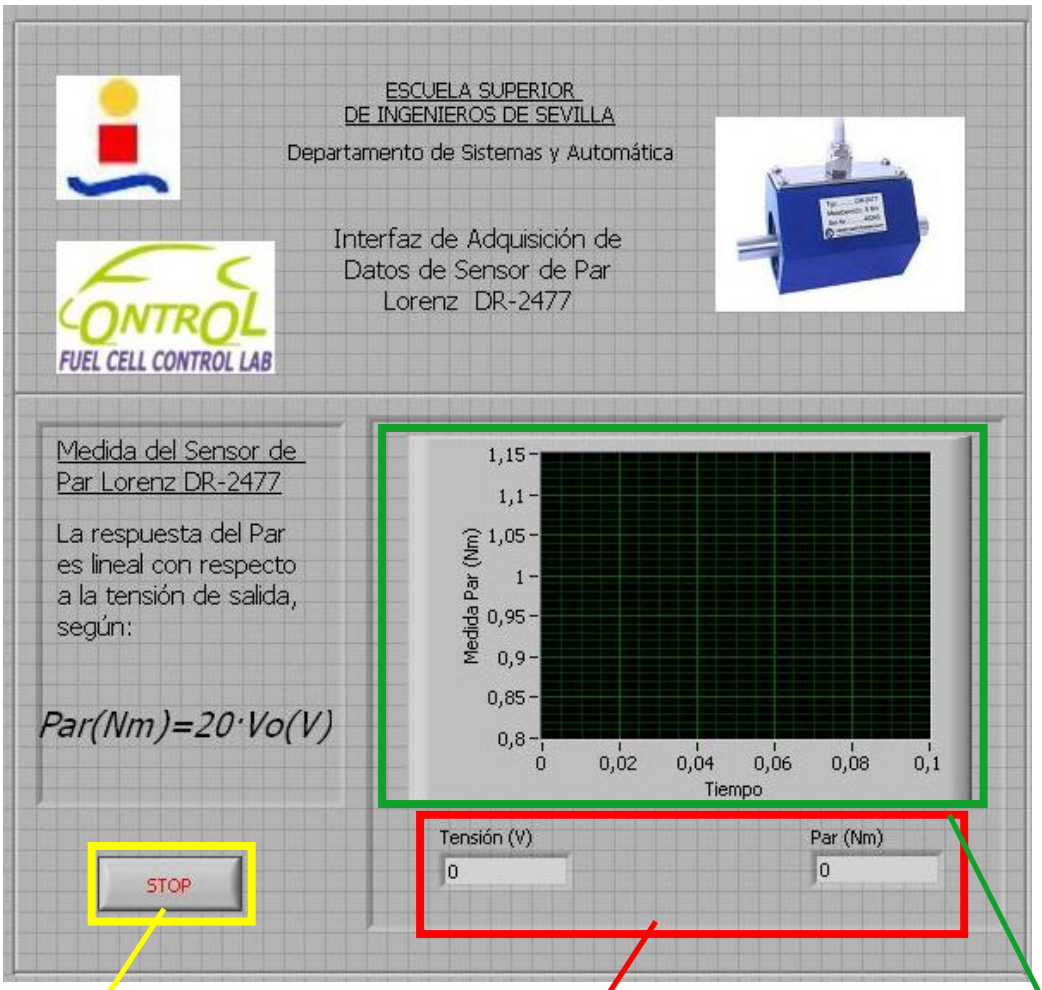


Ilustración 5.8. Interfaz gráfica Sensor_de_Par.vi



Botón para parar la ejecución del programa.

Visualización de la tensión medida y su equivalencia en par.

Visualización de la variación del par con el tiempo.

Ilustración 5.9: interfaz gráfica del sensor de par con las partes más importantes.

La interfaz gráfica del sensor de par es muy simple, el único botón disponible con el que interactuar es el de **STOP** (ver ilustración 5.9), con el que detenemos la ejecución del programa y el guardado de datos en el archivo Excel.

El diagrama de conexiones del programa consta de un "*Flat Sequence*" de dos partes, la primera es la encargada de crear y abrir el archivo de Excel donde se guardarán los datos. La segunda parte es donde se leen los datos requeridos y se guardan en el archivo correspondiente.

La programación en Labview™ es la que se muestra a continuación:

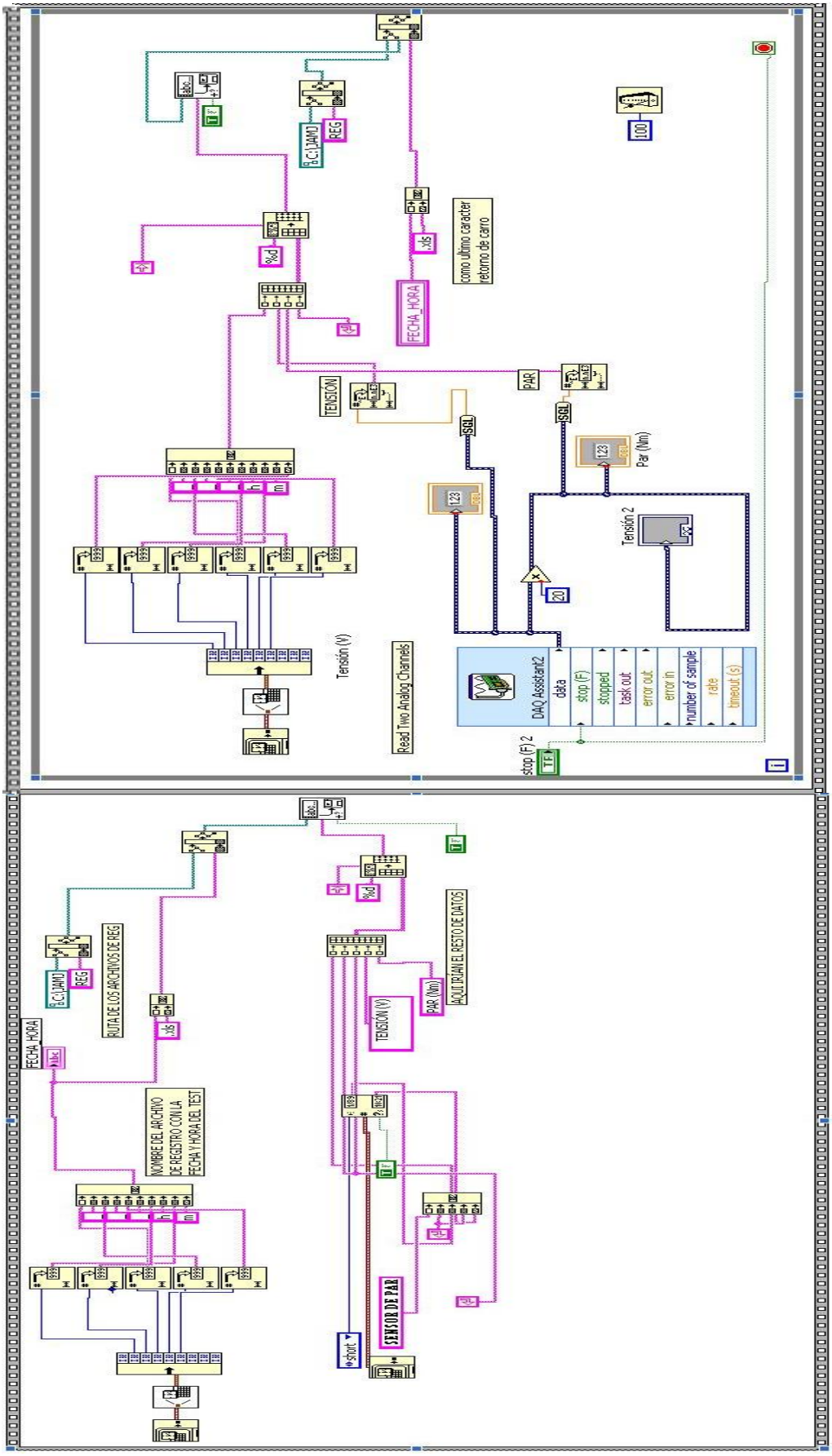


Ilustración 5.10: Diagrama de conexiones de la interfaz gráfica del sensor de par.

5.3.1 Primera parte del "*Flat Sequence*":

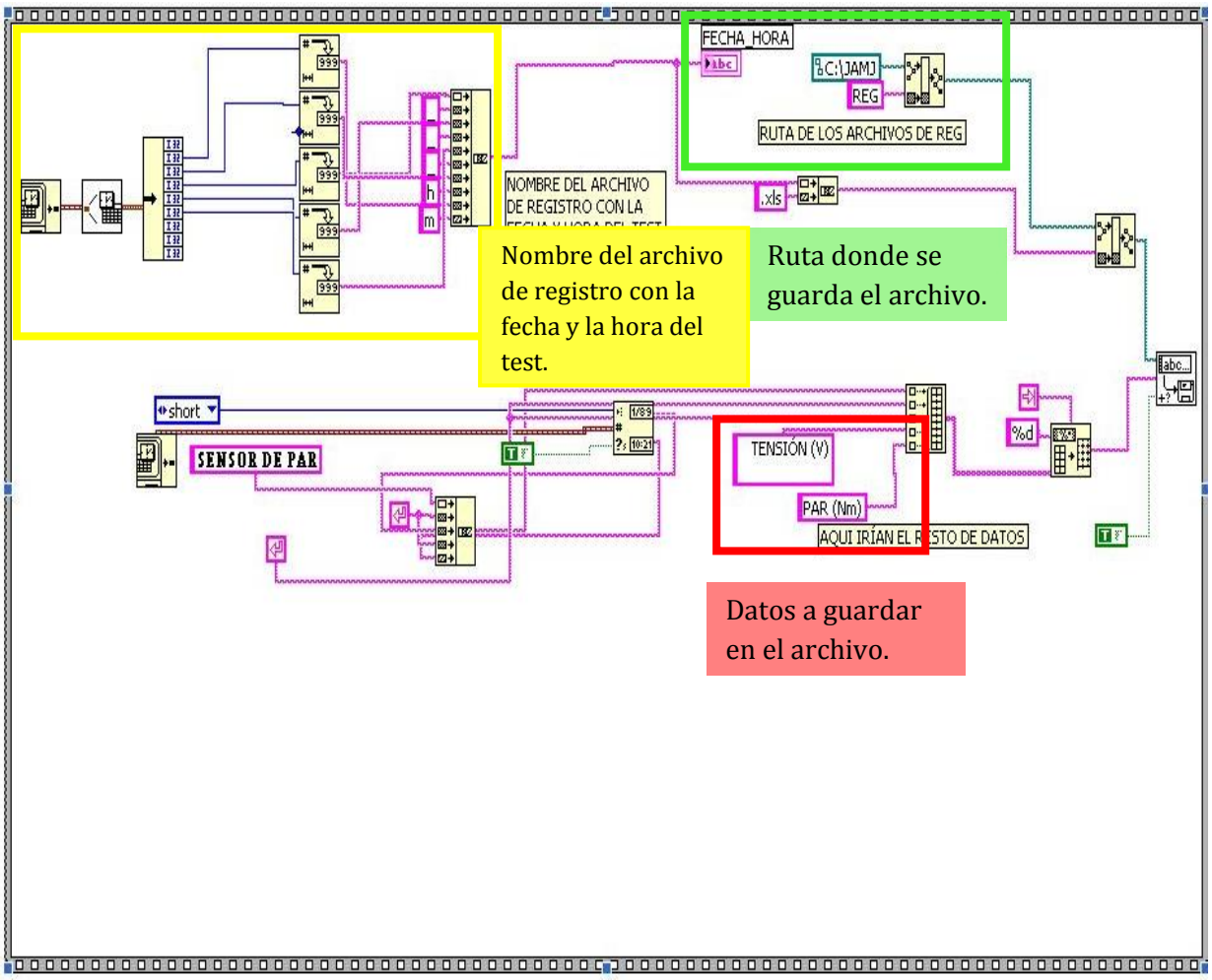


Ilustración 5.11: Parte primera del "*Flat Sequence*".

El archivo se guardará en la ruta que le indiquemos, en nuestro caso se guardarán en C:\JAM \REG y como nombre tendrá la fecha y la hora del ensayo. Como ejemplo de nombre de archivo tenemos: 12_7_2011_12h51m.

Esta parte es común para todas las interfaces gráficas realizadas, cambiando solamente los datos que se quieren guardar en el archivo Excel. La ruta puede ser la misma, o se podría modificar creando una carpeta para cada elemento, con lo que tendríamos los archivos separados por elementos.

5.3.2 Segunda parte del "*Flat Sequence*":

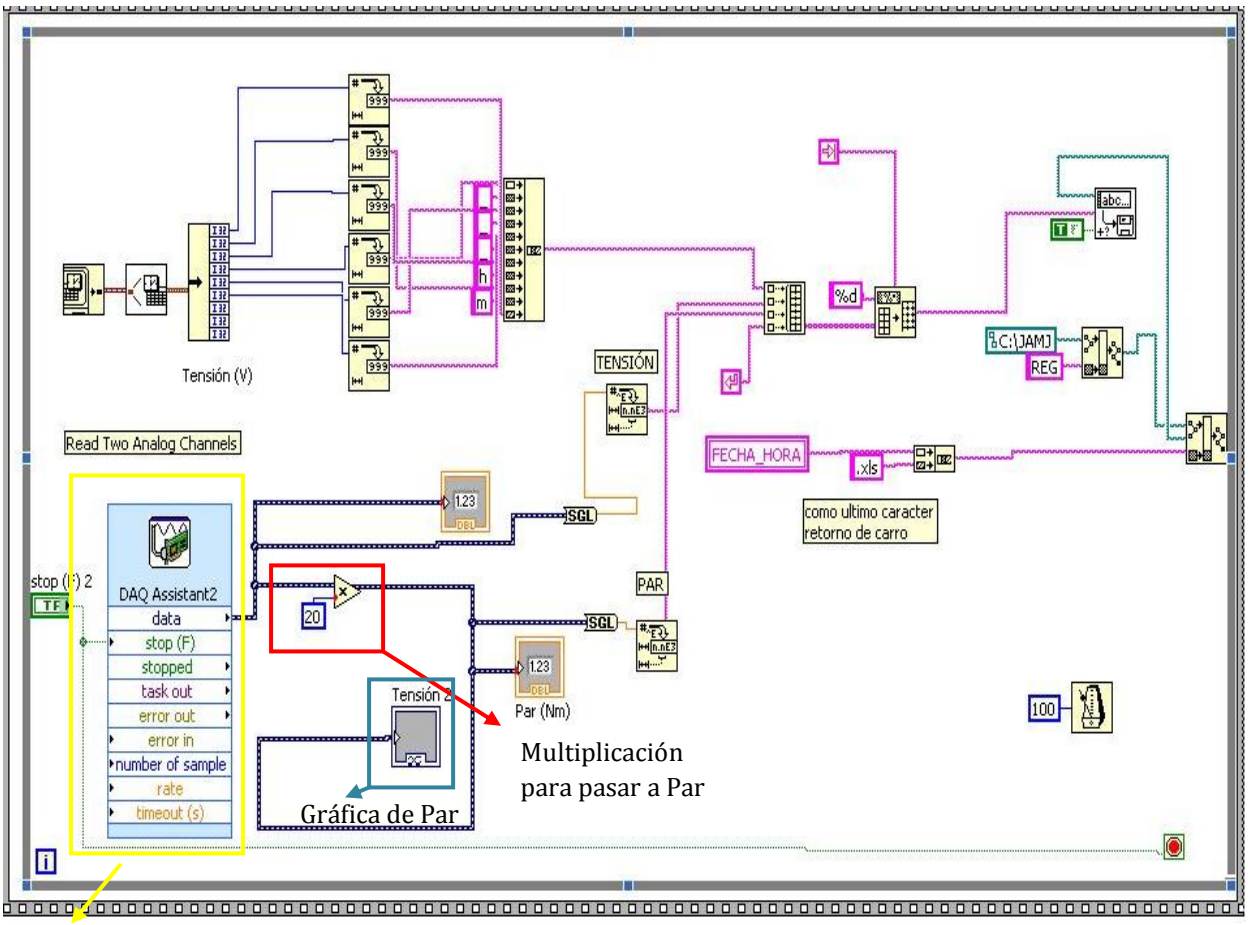


Ilustración 5.12: Parte segunda del "*Flat Sequence*".

Esta parte es la que contiene el programa principal, que es diferente para cada elemento. En esta parte se leen los valores necesarios a través del bus, se muestran a través de la interfaz gráfica las gráficas o valores que queremos, se hacen las operaciones necesarias, y se guardan los valores unos tras otros en el archivo Excel. Lo primero que nos encontramos es un *bucle "While"* que repite las operaciones que contiene una y otra vez hasta que se pulsa el botón de **STOP.** En este caso (ver ilustración 5.12), las operaciones realizadas además de la lectura de la tensión a través del búfer, consisten en la multiplicación para cambiar la tensión al par correspondiente mediante la regla explicada anteriormente, dichos valores de par son recogidos en una gráfica que se muestra a través de la interfaz, estas dos variables (tensión y par) se guardan en sendas variables y a continuación se transforman al formato adecuado para su posterior escritura en el archivo Excel.

Un ejemplo de tabla de Excel obtenida por el programa *Sensor_de_Par.avi* se puede observar en la ilustración 5.13:

SENSOR DE PAR		
30/09/2011		
12:09:53		
	TENSIÓN (V)	PAR (Nm)
30_9_2011_1	7,16E-01	1,43E+01
30_9_2011_1	6,91E-01	1,38E+01
30_9_2011_1	6,69E-01	1,34E+01
30_9_2011_1	6,47E-01	1,29E+01
30_9_2011_1	6,27E-01	1,25E+01
30_9_2011_1	6,08E-01	1,22E+01
30_9_2011_1	5,89E-01	1,18E+01
30_9_2011_1	5,71E-01	1,14E+01
30_9_2011_1	5,53E-01	1,11E+01
30_9_2011_1	5,36E-01	1,07E+01
30_9_2011_1	5,19E-01	1,04E+01
30_9_2011_1	5,03E-01	1,01E+01

Ilustración 5.13: Archivo obtenido con Sensor_de_Par.avi.

5.4 Ensayos del sensor de par:

Para poder probar el sensor de par antes de ponerlo en funcionamiento se diseñó una prueba mediante una llave dinamométrica calibrada con la que se pueden medir varios valores de par.

La primera prueba resulta fallida debido a la rotura de un tornillo del sensor cuando me disponía a introducir el eje en éste. Al apretar el tornillo para que la parte cónica tuviera el suficiente apriete como para que el eje no deslizara en el interior del sensor, el tornillo se rompió. Es por esto por lo que se ideó otro sistema, mediante una pieza que iría unida al sensor de par mediante tornillos.

En la ilustración 5.14 podemos ver el montaje de la segunda prueba realizada al sensor de par, y que fue realizada con éxito.

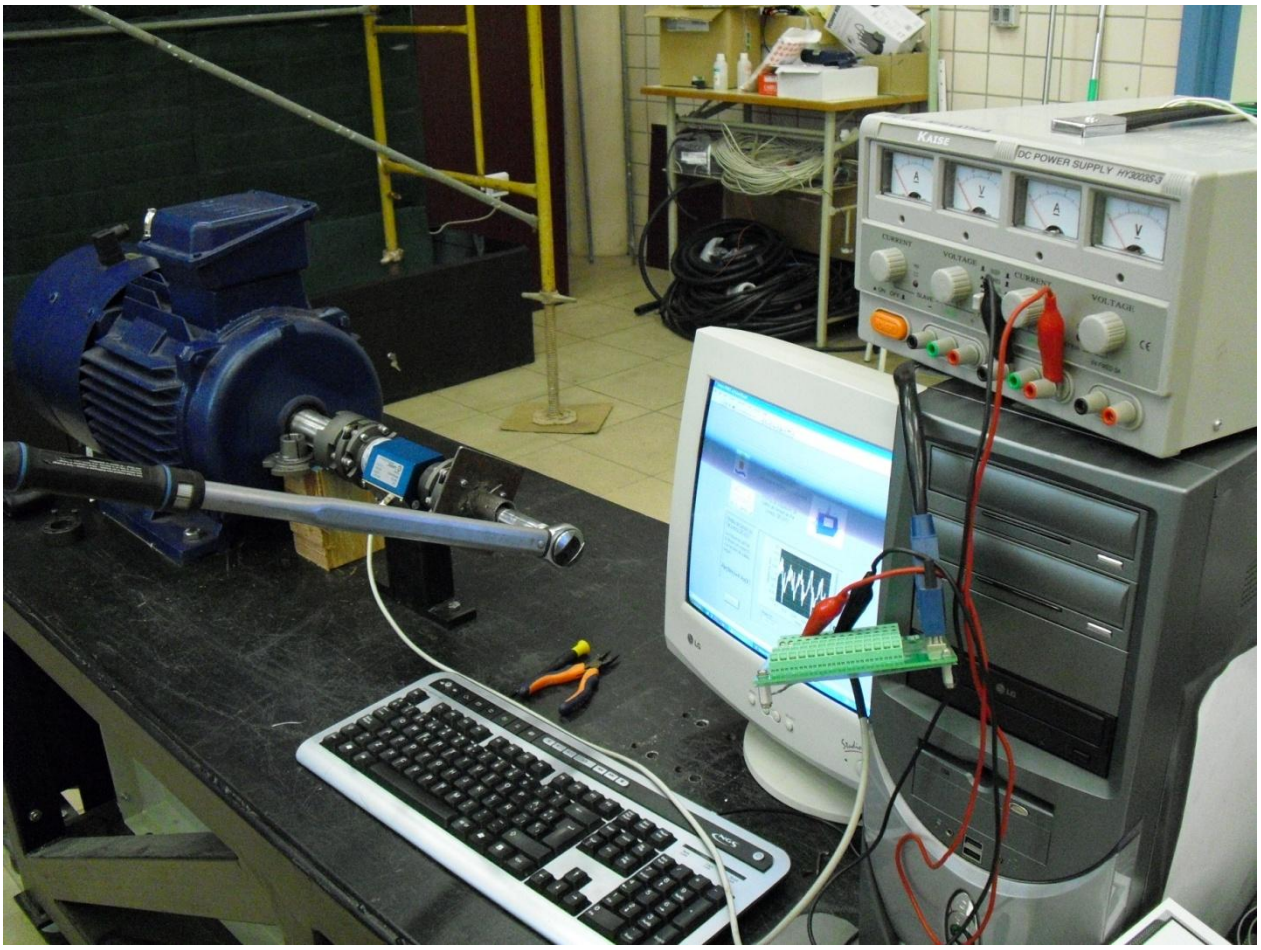


Ilustración 5.14: Ensayo al sensor de par.

El ensayo tiene por componentes una pieza atornillada al sensor de par (pieza 1), que consiste en una chapa con un tubo hueco soldado donde se introduce la pieza 2, que es una pieza cilíndrica de aluminio con un tratamiento de endurecimiento con el diámetro adecuado de 2 cm, al que le he dado la forma de una llave de tubo hexagonal de 17 mm. En la parte hexagonal de la pieza 2 se introduce la llave de tubo de 17 mm y se une ésta a la llave dinamométrica, con lo que la parte mecánica de la prueba ya está montada.

Los materiales usados han sido los que se han podido obtener por cuenta propia, por eso no son homogéneos. Destacar que el trabajo ha sido íntegramente realizado por el alumno desde los taladros a la soldadura pasando por la pieza de aluminio (realizada con una esmeriladora).

En la ilustración 5.15 se puede observar la pieza que se atornilla al sensor de par (pieza 1):

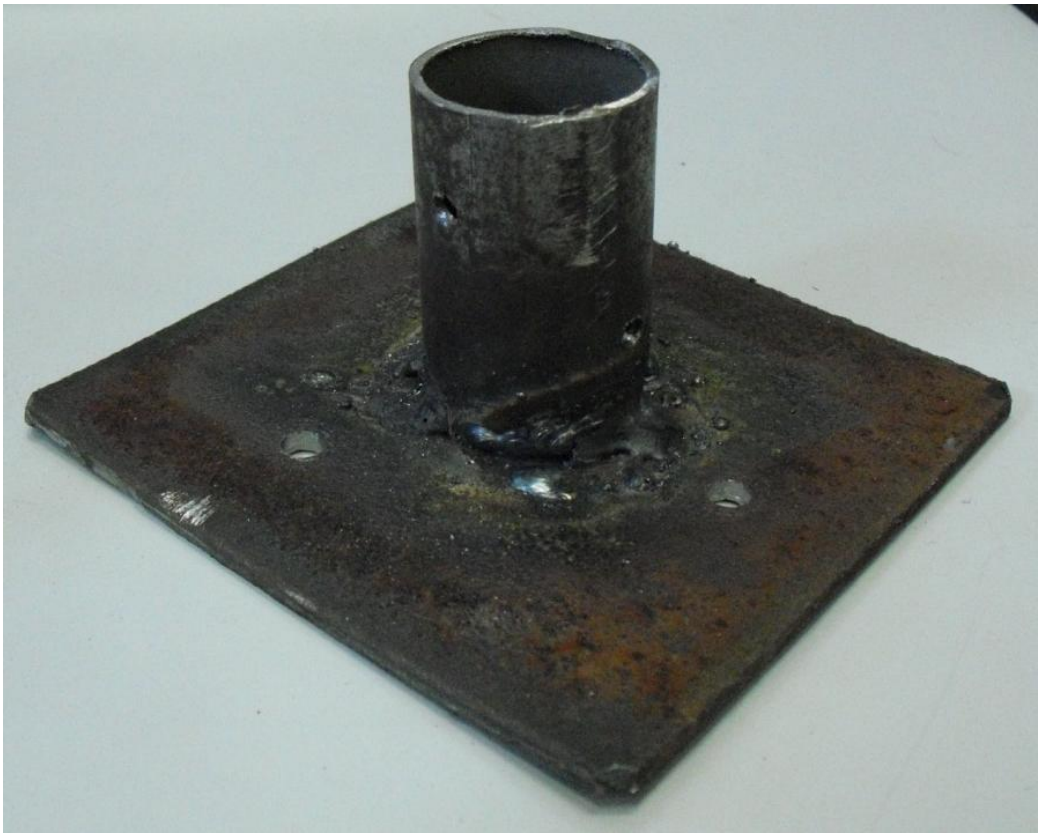


Ilustración 5.15: Pieza de unión con el sensor de par.

Ilustración 5.16: Pieza 2, donde se conecta la llave dinamométrica (con forma hexagonal).

En la ilustración 5.16 se puede observar a la pieza 2. Dicha pieza se atornilla a la pieza 1, y se une a una llave de 17 mm con forma hexagonal a la llave dinamométrica.

En la ilustración 5.17 se muestra el montaje completo de todo el sistema mecánico, formado por el sensor de par, pieza 1, pieza 2, llave de 17 mm y llave dinamométrica.

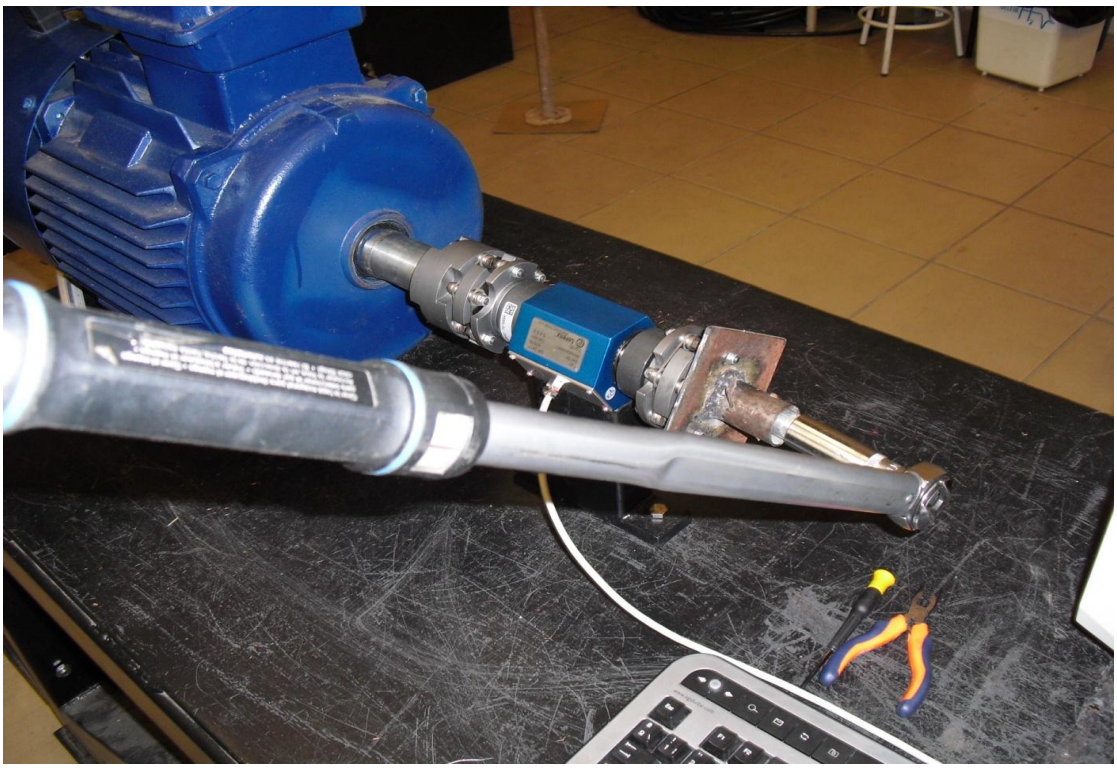


Ilustración 5.17: Montaje de la parte mecánica.

Para la parte electrónica o de medida sólo queda instalar los elementos necesarios para recoger la medida que nos indique el sensor. Los elementos necesarios serán una fuente de alimentación para alimentar el sensor, la tarjeta de adquisición de datos de Labview™ que estará instalada en un ordenador donde tendremos la interfaz gráfica del sensor y el circuito limitador de tensión para proteger al sensor de par. En la ilustración 5.18 podemos ver el montaje de todos estos componentes, mientras que en la ilustración 5.19 podemos ver como se divide el cableado del sensor en cableado para su alimentación y cableado de señal.

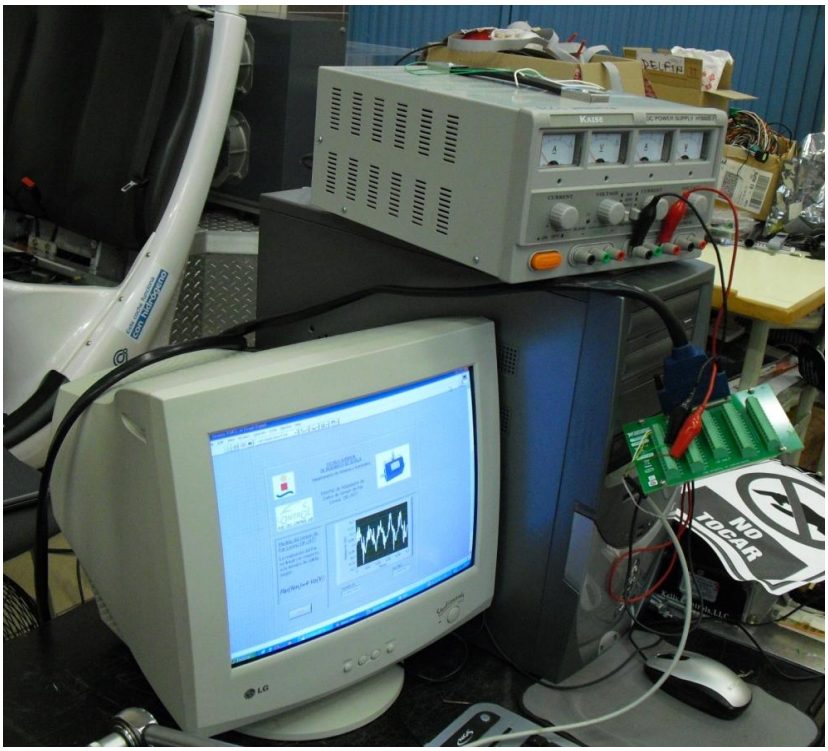


Ilustración 5.18: Montaje de la parte electrónica de recogida de datos.

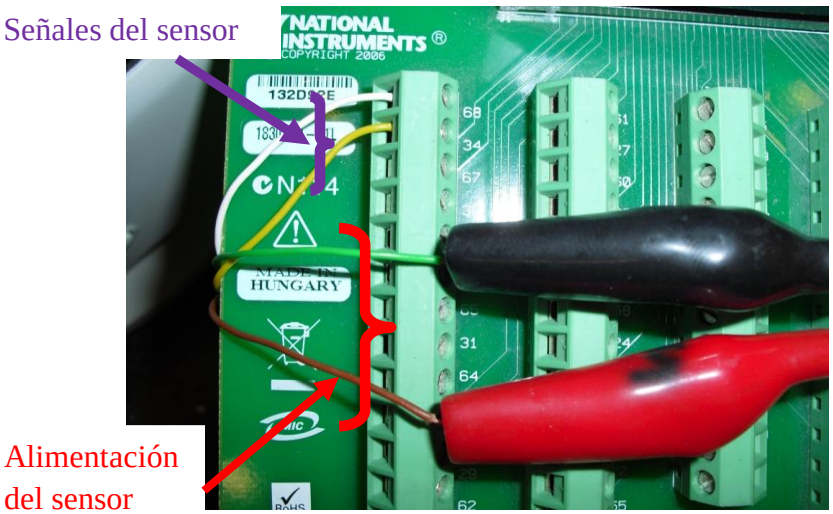


Ilustración 5.19: Conexiones del sensor de par.

5.4.1 Resultados obtenidos del ensayo:

Se realizaron dos pruebas de ensayo, una prueba se realiza con una tara de 60 Nm en la llave dinamométrica y la otra a 80 Nm. Las gráficas provenientes de los datos tomados del ensayo guardados en el archivo *.xls* son las mostradas a continuación:

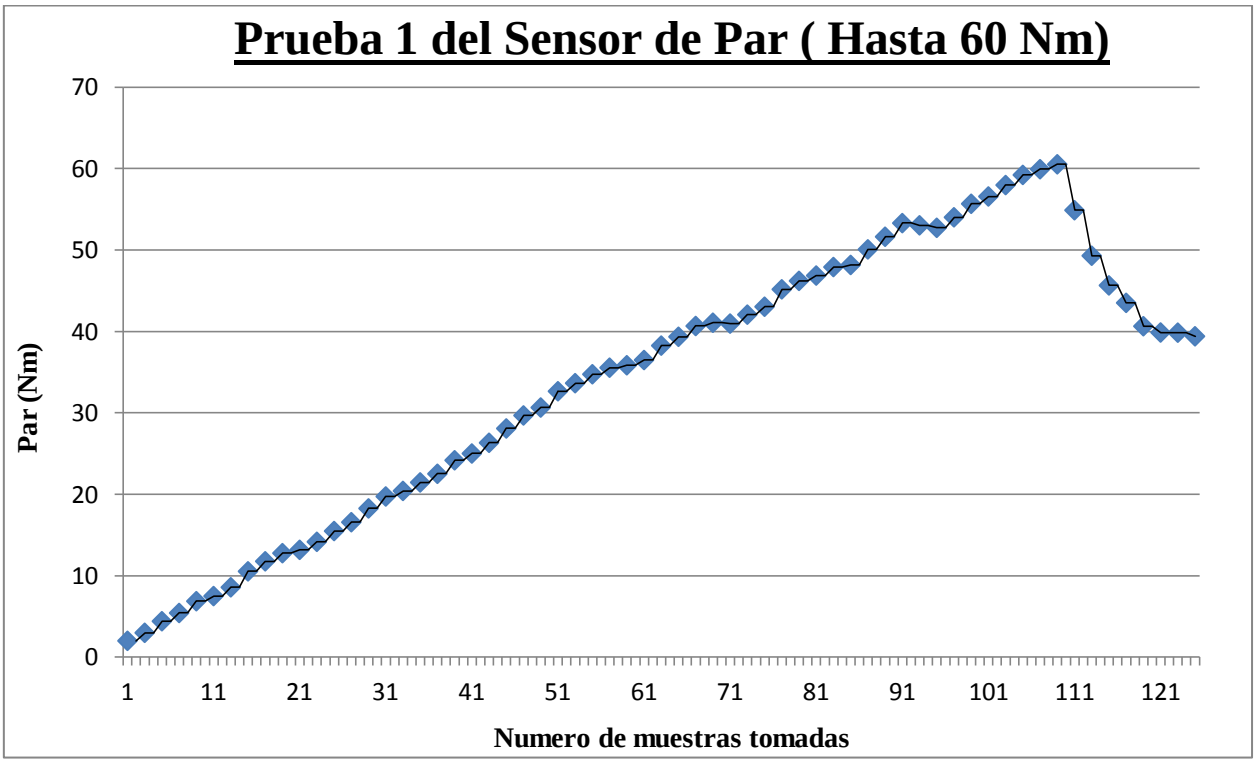


Ilustración 5.20: Prueba 1 del sensor de par hasta 60 Nm.

En la gráfica mostrada en la ilustración 5.20 se aprecia como el sensor mide el máximo aproximadamente a unos 60 Nm (exactamente mide 60,5 Nm), que es como estaba tarada la llave dinamométrica.

En la segunda prueba (ver ilustración 5.21) la tendencia es más irregular debido a los grandes esfuerzos requeridos y al cuidado excesivo de no romper ningún componente. El máximo se produce aproximadamente a unos 80 Nm (exactamente 83,3 Nm) que es el tarado que le había dado a la llave.

En las gráficas sólo se recoge una parte de los datos medidos, los necesarios y suficientes para mostrar la validez del ensayo.

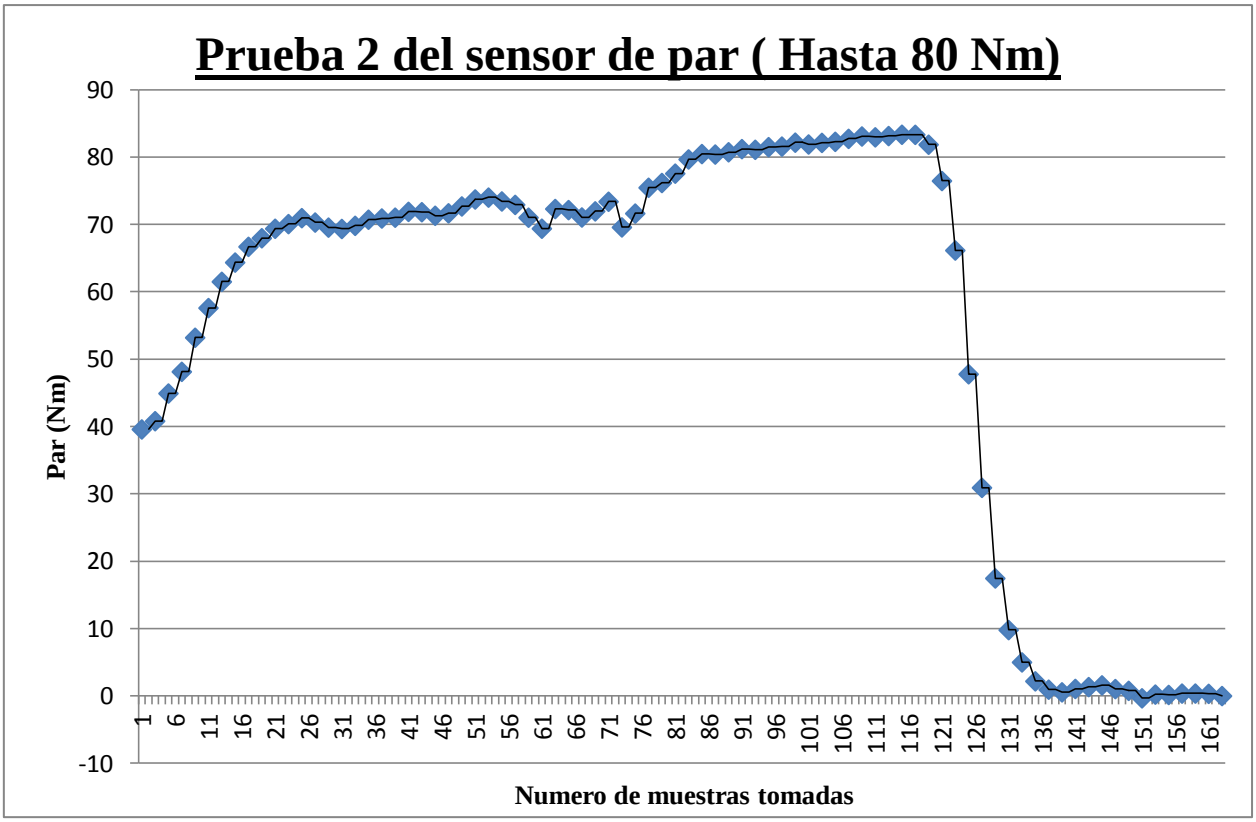


Ilustración 5.21: Prueba 2 del sensor de par hasta 80 Nm.

Se considera que las dos pruebas son satisfactorias ya que las diferencias medidas entre el sensor de par y la llave dinamométrica son muy pequeñas (0,8333 % para 60 Nm y de 4,125 % en el caso de 80 Nm), y dichas diferencias están debidas a la tolerancia de la llave dinamométrica o la perfecta alineación de los ejes entre otros factores.